

贡嘎山亚高山森林自然演替特征与模拟

程根伟, 罗 辑

(中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要:通过对贡嘎山典型天然林样地动态的调查和群落结构的研究, 基本掌握了青藏高原东部亚高山森林植被的演替特征和过程, 在自然生存竞争条件下, 树木的种源通过扩散、就地下种和萌发新枝产生的幼苗只有极少数能够生长成大树。在树木繁育过程中, 光照、水分、温度和养分竞争是决定性条件, 山地灾害干扰对森林的更新也具有重要作用。提出的贡嘎山森林演替模型(GFSM)在树木个体生命史模拟的基础上重现了群落的演替动态, 特别是将土壤形成与树木演变结合起来, 采用随机过程模拟气候波动及单木生长死亡的不确定性, 揭示了亚高山天然条件下的森林个体与群落的行为动态, 对于解决天然林更新与保护提供了系统的分析预测技术与理论。

关键词:森林演替; 动态模拟; 林窗模型

Successional Features and Dynamic Simulation of Sub-alpine Forest in the Gongga Mountain, China

CHENG Gen-Wei, LUO Ji (*Institute of Mountain Hazards & Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1049~1056.

Abstract: The Gongga Mountain of eastern Tibet Plateau is representative of the alpine region with high peak and deep valleys. Climate change over the last thousand of years had controlled the dynamics of glacier and debris-flow bursting, which resulted in substantial changes in the mountainous environment. We surveyed community structure of primary forests in Gongga mountain and forest successional processes in wood plots. The changing features in sub-alpine environment are discussed in this paper. Tree species and size between glacial shrinking area and debris-flow fan in Hailuoguo valley are compared. The pioneer species that settle in debris-flow fan and glacial shrinking area are *Salix* spp. and *Populus purdomii*. *Abies fabri* and *Picea brachytyla* are the climax tree species, respectively. The primary vegetation successional process in Hailuoguo (2700~3200m) can be divided into four stages:

Slash surface (20~200a)→*Salix-Populus* seeding community (10~30a)→*Populus-Salix* sapling community (30~100a)→*Populus-Abies* mixed community (50~100a)→*Abies-Picea* climax.

In a natural and undisturbed environment, trees compete for light, water and nutrients, and therefore, only very few trees grow up and mature through spreading, seeding or sprouting. Disaster disturbances in mountain is an very important driving factor for regeneration of woody plants. Repeated destruction of forest by glacial movement or debris flow generated additional forest gaps that allow young plants to grows. In this study the Gongga Forest Succession Model (GFSM) was developed for simulation of forest community successional processes in different scale in Gongga Mountain. The GFSM is a modified version from the Newcop Model that had been used in Northeastern China. A soil succession module was added in to the GFSM model to simulate soil formation and chemical element change of woodland. In order to represent major features of forests in Southwestern China, many field works have been done to identify ecological parameters of various trees in the sub-alpine region.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1998040800); 中国科学院重大资助项目(KZ951-A1-204, KZ95T-06)

收稿日期: 2002-05-20 日期: 2001-12-10

作者简介: 程根伟(1956~), 男, 成都市人, 博士, 研究员。主要从事水文学与森林生态学研究。

In GFSM, the regeneration module simulates tree seeding in patch, spreading over patch, shouts sprouting and theirs growing up to young tree of each species. The growth module simulates stem increasing of individual tree under its environment. The death module simulates random death of young trees, low-growth death of mature tree in a competitive environment, and natural death of old trees. The environment module determines stochastic change of weather and eco-environment parameters such as mean monthly air temperature, precipitation, dry period, evaporation and soil water. The simulation result of these modules can be affected by environment disturbance that is modeled through random rainfall-temperature processes generation. Other parameters relative to forest status are described by the canopy module that estimates canopy height, leave growth and distribution, leave hanging and falling time, and wood biomass. The soil module simulates accumulation, decay and mineralization of forest litterfall, and computes changes in soil chemical elements due to humus accumulation and rainfall scouring. The GFSM is run at monthly time step.

On the basis of simulation of tree's life history, the GFSM combined forest succession with soil change in both material components and nutrition content. The Monte-Carlo method was applied to simulate random weather fluctuation and the uncertainty of tree death.

These modeled processes agreed with the field investigation results in this region. The elevation distribution of different tree species was also simulated; and the results are consistent with field observation of ecological features of tree species. The modeling approach reflects well the succession dynamics of primary forests in Southwestern China. These results are very useful for improving the management policies and prediction technology for restoration and conservation of primary forests in Southwestern China.

Key words: Gongga mountain; forest succession; dynamic simulation; forest gap model

文章编号:1000-0933(2002)07-1049-08 中图分类号:Q143 文献标识码:A

青藏高原东部的横断山区是中国第二大林区的中心,森林的蓄量和木材供应量仅次于东北林区。该地区的特点是山高谷深,地形起伏大,林带的垂直带谱分明。由于优越的气候和降水条件,这里的森林物种非常丰富,生物生长量也比较高。在过去几十年里,四川林业科学研究所、中国科学院成都生物所、中国科学院成都山地所以及其它部门在该地区做了多年的野外森林样地调查研究,在森林的种群结构、生物量、生态效应及森林经营上取得了大量的研究成果^[1,2]。

在天然林保护工程中,一个重要的理论问题是深入地反映林地生长条件的相互作用与积累效应,即能比较真实地重现(仿真)现有林地的结构和演替历史。能够表现森林动态的数学工具主要有森林景观模型、群落模型、林窗模型、种群模型和生理模型等,而近年来发展最有前途的是以个体模拟为对象的林窗模型,它的特点是对称为林窗的斑块内的每个单木的新生、成长、死亡做出动态描述,并能够反映群落内的光照、温度、水分和养分等环境要素对树木生长的胁迫作用。林窗模型能够在普通森林调查资料的背景下对森林的演替做出比较逼真的模拟。贡嘎山是横断山系的主峰,该区域保存有非常原始的天然森林类型,并积累了大量的调查资料和研究成果,这对探索森林系统的演替准备了很好的工作基础,研究贡嘎山天然林地演替可以从个体角度探索森林群落的演替机制,对于西南地区的天然林保护和更新问题也具有重要作用。

1 亚高山森林概况

以贡嘎山为代表的横断山地区森林类型特别丰富,海拔 1400m 以下为干旱河谷,现在森林所剩无几。1400~1800m 为农林复合区域,年均气温 12~15℃,年降水 1000mm。主要树木为人工栽种的经济林木及薪炭林,多为速生青冈(*Cyclobalanopsis*)、香杉(*Cunninghamia lanceolata* Hook)、核桃(*Juglans acerba* lindl)、柿子(*Diospyros* F.)等。1900~2300m 为常绿阔叶林带,年均气温约 10℃,年降水量 1500mm,主要树种有苞欏柯(*Lithocarpus cleist.*)、油樟(*Cinnamomum longepani*)、山楠(*Phoebe chinensis*)、巴山栎

(*Quercus engleriana*)、野桂花(*Osmanthus*)等。2400~2800m 为针阔叶混交林带,当地年均温度约 6℃,年降雨量 1700mm,主要树种有杜鹃(*Rhododendron*)、铁杉(*Tsuga chinensis*)、麦吊杉(*Picea brachytyla*)等。2800~3600m 为暗针叶林带,年均气温为 4℃,年降水量达到 1940mm,主要树种是峨眉冷杉(*Abies fabri*)、糙皮桦(*Betula utilis*)、花楸(*Sorbus*)等。并在林内分布有大量的杜鹃(*Rhododendron*)、沙棘(*Hippophae rha.*)、箭竹类(*Sinarundinaria fangiana*)灌丛。

贡嘎山东坡的林线在 3700m 高度,林线以上为高山灌丛,主要是高山杜鹃(*Rhododendron villosum*),4000m 以上是高山草甸。4500~4900m 为稀疏植被流石滩,4900m 以上的区域就是冰雪寒冻带,没有植物分布。

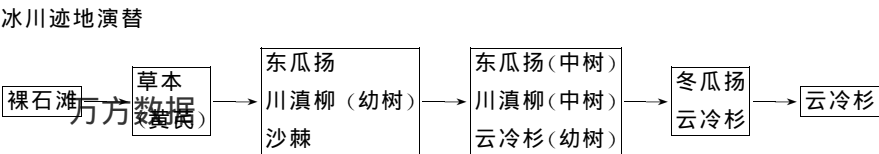
贡嘎山区是现代地貌作用非常强烈的地区,山谷冰川发育,崩塌滑坡与泥石流冲刷和其它地表剥离现象在沟谷坡地上经常出现,在 1100a 前海螺沟有过 3 次较大规模的冰川推进,形成了现在的冰川侧积堤和堤后台地,800BP 之后冰川基本上呈退缩状态。这里的泥石流规模也很强烈,最近一次大型泥石流爆发是在约 70a 前。在冰川和泥石流所到之处,森林可以完全被毁灭,而在它们没有波及的位置,森林又保存得很好,在特定的气候环境下,冰川或泥石流可以反复侵入同一个地区,在这里就可以找到冰川退缩迹地或泥石流滩地开始的植被演替原型。即在一个范围内保存的从迹地到先锋群落再到顶级群落的连续植物演替序列。

2 森林自然演替特征

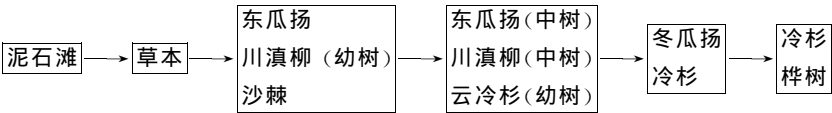
为了全面了解山地森林自然演替过程及物种聚落特征,在贡嘎山东坡 3000m 森林区,沿冰川和泥石流退缩方向设置了一系列调查样地,样地间隔大约在 50m,面积在 10×10~40×40m²。调查样地的植物种类、数量和优势木年龄,采集土壤样品测定有机质和营养元素含量,并对其中的冬瓜杨(*Populus purdomii*)和峨眉冷杉(*Abies fabri*)做了解析木分析,计算树木年龄和生长量。通过这种调查测量,基本上掌握了每一种样地距冰川或泥石流退缩后期开始的优势树种年龄,以及各年龄林地的生物量。

根据野外调查的结果,最先侵入冰川底积的先锋植物有高山柳(*Salix* spp),冬瓜杨(*Populus purdomii*),小叶黄芪(*Astragalus, Polycladus*),大叶黄芪(*Astragalus, Sungpanensis*)等。冰川侧积堤的漂砾很多,泥沙含量不高,沙棘是主要的先锋群落树种。随后冬瓜杨的树高优势得到体现,其适应能力超过高山柳和沙棘,成为后期主要的建群种,群落发生自然稀疏,拓展了生态位,为峨眉冷杉、麦吊杉等阴性树种的侵入和生长提供了条件,而沙棘和高山柳出现衰退而退出群落。糙皮桦和云、冷杉几乎同期进入先锋群落。由于云冷杉幼龄期生长速率低于桦树,前期桦树生长优于杉树,但在云冷杉生长到 50a 之后,树高优势起作用,林冠达到群落顶层,桦树居于第 2 层次。因此在演替的中期,桦树与云、冷杉树成为主要的针阔叶混交林树种。在 80~100a 左右,顶极适应种(云、冷杉)成为主林层的建群树种,这时如果没有其它干扰,可能形成树木品种较少(只有两三个优势种),树高整齐,树径均匀,林下干净(缺少灌木草本)的均一群落结构,这个状态可以保持到达到成熟林(约 160~200a),之后开始发生老弱树木成批死亡,林窗这时才开始出现,自然更新再次开始。在此之后,建群树种的胸径与树高都开始分化,大中小树木都有生长,立木胸径比较均匀化,只有这时,才可以找到传统理论所说的稳定顶极群落结构。

在森林自然演替过程中,光照的适应性与竞争是决定物种出现次序和优势度的关键因素,与其相关的有树高、叶面指数、耐阴程度和冠层高度分布等因素。因此作为单木模拟成败的关键环节,就是必须解决树木在群落中的光照和竞争能力计算。此外,对于高山深谷区现代地貌外营力强烈的地区,土壤是与植被演替同时变化的环境要素,其中岩石的风化非常缓慢,而林地上层土壤主要是由森林产生的腐殖质组成,它的形成与积累应该作为森林系统演变的相关要素同时处理。根据对海螺沟内森林的研究,贡嘎山海拔 3000m 林区的迹地演化过程为:



泥石流滩演替



贡嘎山地区的这种森林演替历史记录为研究森林的更新和演替动态提供了理想的现实原型,可以用来检验森林演替理论和改善模型设计。

3 贡嘎山森林演替模型

贡嘎山森林演替系统模型(GFSM)是以 Botkin 提出的林窗模型(Forest gap model)为基础的单木模拟模型^[3,4],它以多个小面积(斑块 patch)上的林分表现作平均,描述斑块中每单木的萌发、生长、死亡过程、树种更替及与环境因子(水分、光照、热量、养分)的关系,并按随机过程方式模拟环境条件的变化,以统计试验模拟树木的更新与死亡中的外在和内禀不确定性。根据许多生态学者多年的努力,现代的林窗模型已经相当完善,其优点是只用比较少的基本假设即可构成对森林系统的完整描述,并在不同类型森林的模拟中证实了它的合理性。美国的 JABOW 模型,FORET 模型,KIAMBRAM 模型可以分别适用于美国东部硬阔叶林、南部森林、亚热带雨林^[5~7]。美国 Illinois 大学开发的 SmartForest 森林模型还引入了虚拟现实技术,将模拟结果用虚拟陆地森林图像直观地展示出来^[8~12]。延晓冬、赵士洞在引进和发展我国东北林区的林窗模型上做了重要的工作,他们开发的 Changfor、Newcop 模型能够对东北广大地区林地特征和类型做动态描述^[13,14],并探索用该模型研究气候变化对生态系统的影响。

贡嘎山森林演替系统模型是在 Newcop 模型的基础上的一种改进版本。在保持原系统主要模块功能的基础上做了许多改进,并且增加了林地土壤演替功能模块。模型还重新选择了适应西南山区生长的主要树种类型,对各树种的生态学参数进行了分析优选,以反映中国西南高山峡谷区亚高山森林植被演替和物种的基本特性。

GFSM 的结构如图 1。

GFSM 模型中更新模块模拟树种的扩散播种、就地下种、死树抽条产生的新苗,及新苗生长到幼树(直径 2cm)的过程;生长模块模拟每株树木的胸径生长与环境胁迫的关系;死亡模块考虑幼树的随机死亡,生长速率不足导致的竞争死亡,老树的衰老死亡;气候模块模拟林地有关的月气温和月降水量,并计算年内的积温、干旱历时、蒸发能力等环境参数。这些模块的运行都由干扰模块提供随机数生成和统计试验控制,以考虑在气候波动、种子萌生和受压木死亡有关的环境及树木个体不确定性。与这些模块有关的林冠特征、叶片生长、叶片垂直分布、落叶过程及生物量等树木特征描述归纳在林冠模块中。土壤演替模块对森林凋落物的积累、腐败、矿化和土壤形成进行模拟。这些模型单元按年为主时间步长进行连续计算,但在气候环境参数模块中的计算是按月时段进行的,以反映气象要素的月动态。由于篇幅所限其详细数学描述从略。

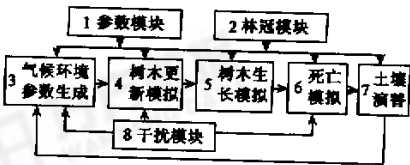


图 1 贡嘎山森林演替模型结构

Fig.1 The structure of the forest succession model of Gongga mountain

- 1. Model parameters 2. Canopy module 3. Climate simulate
- 4. Tree generate 5. Tree growth 6. Tree mortality
- 7. Soil succession 8. Disturbance module

这些模型单元按年为主时间步长进行连续计算,但在气候环境参数模块中的计算是按月时段进行的,以反映气象要素的月动态。由于篇幅所限其详细数学描述从略。

4 模型参数估计

模型的结构是对所模拟的对象基本物理(生理)机制和一般规律的概化,而具体对象的客观属性是由模型的参数来规定的。过去的研究工作集中在中国东北的森林生态学参数,并获得适用于东北林区的林窗模型参数^[1~3],但西南地区气候、土壤和物种与东北完全不同。东北森林系统参数不能用于西南林地研究。为此结合川西森林区的调查,对森林演替模型的参数做了较深入的探讨。

GFSM 模型参数较多,它们代表不同树种的生物学特性和立地的环境要素,参数的选取既需要对当地气候土壤环境和生物种类的综合知识,也是大量野外调查工作的总结,对于做出森林群落的动态仿真

非常重要。

对于树木生长的模拟,主要是建立在树干直径的生长变化规律的基础上,其它林木参量(如材积、生物量、叶面积等)是由树干直径的关系间接推算的。在最优环境下,树木的胸径 DBH 的最优生长方程为:

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{opt} = G \cdot D \frac{1 - \frac{D \cdot H}{D_{max} \cdot H_{max}}}{160 + 3260 + 3b_2D - 4b_3D^2}$$

在受环境因子 $FE(Es)$ 影响下,实际增长为:

$$\frac{dD}{dt} = F_E(Es) \cdot \left(\frac{dD}{dt}\right)_{opt}$$

以上方程中 G 为年轮生长参数, b_1, b_2 是树木形态参数,可以用该树种的最大胸径和树高来估计。最优生长方程的含义是认为树木的胸径增长与叶面积成正比(反映光合作用),而与材积成反比(体现呼吸消耗),由此可以导出树木的生长速率是先快后慢的规律。

林窗模型中的生长参数 G 是影响群落演变的关键参数,但是它的生物学意义不太清楚,很难从树木的野外调查中计算。作者提出了一种新的参数估计方法,可以通过野外调查的树木生长函数计算生长参数 G 。对主要生长期取 G 的平均值作为模型的参数(表 1)。

表 1 川西林区主要树种生长参数

Table 1 Growth parameters for dominant trees of western Sichuan Province

树种 Species	长苞冷杉 <i>Abies georg.</i>	峨眉冷杉 <i>Abies fabri</i>	岷江冷杉 <i>Abies faxoniana</i>	鳞皮冷杉 <i>Abies squamata</i>	丽江冷杉 <i>Picea rachytyla</i>	麦吊杉 <i>Picea rachytyla</i>	川西云杉 <i>Picea balfourian</i>	华山松 <i>Pinus armandii</i>	高山松 <i>Pinus densata</i>	糙皮桦 <i>Beutlia utilis</i>	杨树 <i>Populus davidiana</i>	青冈树 <i>Cyclob. alnopsis</i>
参数 G	139.3	120.3	104.6	101.6	102.8	123.4	79.4	136.0	109.8	111.5	78.2	289.4

贡嘎山森林演替模型筛选了四川西部有代表性的 24 个主要乔木和灌木,可以代表从海拔 1800m 到 3600m 高度分布的主要建群树种。根据对这些树种的生物学特性调查,选定了各树种的 10 个生态参数。模型还有 8 个环境(气象、土壤、地形)参数,都进行了参数估计和率定,最后优选用于模型计算。

5 模拟结果与讨论

贡嘎山森林演替模型是基于生存竞争法则对树木群落的动态模拟,其仿真性需要进行验证,一个好的模型应该是对物理(生理生态)现实的良好数学仿真,它能够在不同自然环境和各种边界条件下,对现实原型作出全面和细致的模拟跟踪,对于森林演替模型可以从 4 个方面来加以检验。首先是对从裸地(冰川或泥石流迹地)开始到顶级群落的森林自然演替过程的再现能力,其次是对不同海拔高度林带分布特征的表现能力,第三是对树木群落内部结构(树种比例,径级结构)的仿真能力;最后是对林地土壤及养分变化的跟踪模拟能力。从这些结果的对比可以比较全面地论证模型结构设计和理论假设的合理性,并可以通过校核的结果给出改进的线索。

5.1 森林自然演替过程模拟

贡嘎山地区主要有两类大规模的自然环境干扰,即冰川活动和泥石流爆发,前者的周期在 300~1000a 数量级,后者在 20~50a 左右,前者的规模大于后者,但都可以完全破坏原有的森林群落(包括胸径大于 1m 的大树),产生完全裸露的地表结构。冰川退缩和泥石流爆发后重新开始新一轮森林演替^[4,5]。由于这个地区近代基本没有人为干扰,森林恢复完全是自然演替过程。冰川退缩迹地与泥石流滩地的差别主要是前者的地面以冰积石为主,表层缺少土壤,后者土壤含量比较高,因此模拟的差异就是采用的初始土壤参数不同。

图 2 是冰川退缩迹地的林地演替过程,分别用胸径(DBH),基径面积(Base area),总立木数目(Stems)和生物量(Biomass)来代表。在前面 100a 是裸露岩石风化成土壤的演变过程,到土壤层达到 15cm 厚度之后,才开始树木的生长和演替。

泥石流冲刷迹地森林演替过程与图 2 类似,只是在演替时间上要快得多,在泥石流发生几年后即出现先锋树种,随后的演替过程与冰川迹地相似。

采用模型模拟的林地自然演替的群落结构为：

裸石滩⇒裸土石滩⇒沙棘⇒水冬瓜⇒大叶柳；糙皮桦⇒冷杉。糙皮桦⇒冷杉纯林

从裸石滩变化成裸土石滩约需要 200a,在先锋植物(沙棘、水冬瓜)产生以后,经过 100a 左右可以达到顶级群落的主要林型,经过 150a 达到纯冷杉林,这些模拟的结果与从海螺沟冰川退缩迹地和泥石流迹地林地演替的调查情况完全相同。

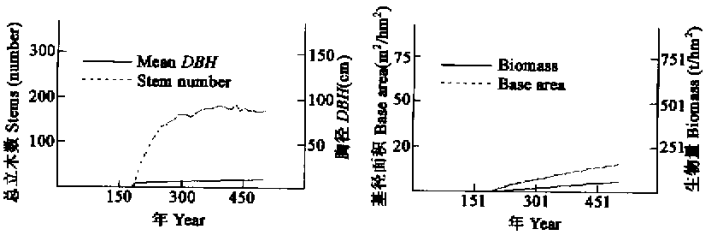


图 2 冰川退缩迹地的森林演替

Fig. 2 The modelled forest succession on glacial shrinkaging slash land

5. 2 森林的垂直分带特征

贡嘎山东坡从海拔 1800m 到 4000m,分别分布有常绿阔叶林,针阔叶混交林,暗针叶林,高山灌丛。采用本模型,分别对海拔 1800~4200m 的情况,按 400m 等高间隔进行模拟,对达到顶极状态后的主要树种类型做出统计,得到表 4。

表 2 不同海拔高度顶极群落模拟建群树种

Table 2 The modelled distribution of dominant tree species for different elevation

主要树种种类 No. of species	海拔高度 Elevation(m)						
	1800m	2200m	2600m	3000m	3400m	3800m	4200m
1	苞欏柯 <i>Lithocarpus</i>	糙皮桦 <i>B. utilis</i>	山光杜鹃 <i>R. oreodoxa</i>	高山松 <i>P. densata</i>	长毛杜鹃 <i>R. villosum</i>	长毛杜鹃 <i>R. villosum</i>	草甸,石滩 Meadow
2	杨树 <i>P. davidiana</i>	麦吊杉 <i>P. rachytyla</i>	糙皮桦 <i>B. utilis</i>	糙皮桦 <i>B. utilis</i>	高山松 <i>P. densata</i>		
3	红桦 <i>B. albo-sine</i>	红桦 <i>B. albo-sin.</i>	高山松 <i>P. densata</i>	峨眉冷杉 <i>Abis fabri</i>	高山栎 <i>Q. aquifoli.</i>		

从模拟结果看,该模型可以重现出从低海拔到高山区的森林类型差异,能够反映青藏高原东部高山峡谷区森林的垂直带谱,各高度上的主要群落类型与结构,基本上体现出本区域各森林群落的特征。模型计算得到的林线高度(3800m)和灌木-草甸分布带位置(4100m)也符合贡嘎山区调查的实际情况,因此该模型的区域适应性是比较强的。

5. 3 森林的径级结构与生物量

图 3~图 5 是对典型的阔叶林(1800m)、针阔叶混交林(2500m)和冷杉林地(3000m)进行模拟得到的树木径级结构与生物量变化过程。从模拟的结果看,森林自然演替过程是在先锋树种开始后 20~30a 中达到最高立木数值(2000 株/hm² 以上),但主要是幼树,林地总生物量并不大,随着以后的生长竞争中,立木数目迅速减小,树木的径级开始分化,有的成长成为大树,多

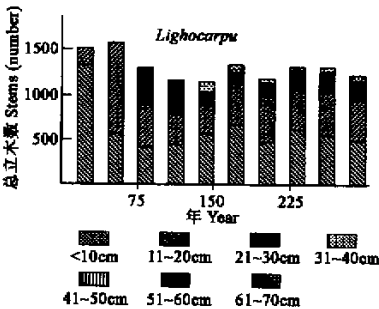


图 3 1800m 阔叶林(苞欏柯)演替过程

Fig. 3 Succession process of broad-leaf woods (*Lithocarpus*) in 1800m

数逐渐死亡,造成林内林窗的出现,随后新的更新开始,总生物量增加最快。达到顶级群落后,树木的胸径分布比较均匀,从大到中小树木都有分布,一般这需要约 300a 左右达到稳定状态,但是即使是结构趋于稳定的顶级群落,林地的总生物量也仍有缓慢的增长。

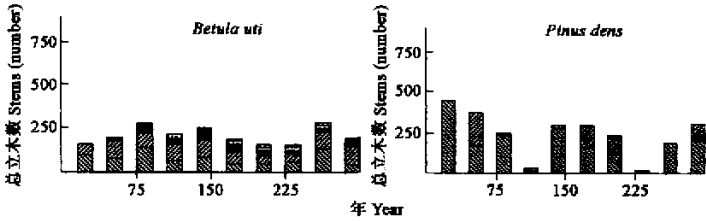


图 4 2800 针阔混交林(糙皮桦和高山松)演替过程

Fig. 4 Succession process of broad-coniferous leaf woods (*Betula* and *Pine*) in 2800m

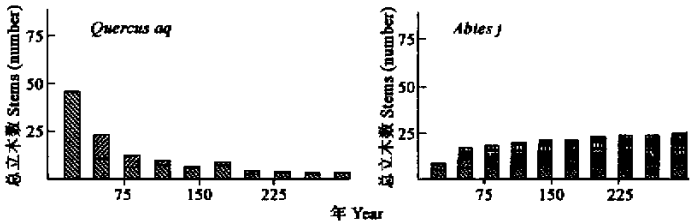


图 5 3000m 针叶林(冷杉林)演替过程

Fig. 5 Succession process of coniferous leaf woods (*Abies fabri*) in 3000m

5. 4 林地土壤的演化

通过对林地土壤的状态模拟,可以得到这样的基本特征(图 6)

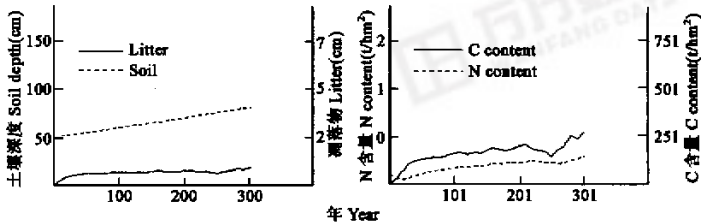


图 6 3000m 林区森林土壤演变过程

Fig. 6 The change processes of forest soil layers in 3000m woods land

在森林没有出现以前,裸地土壤主要由物理风化、苔藓积土和灌木草丛生物作用形成。其中风化和苔藓作用在裸露岩石上,花岗岩的风化过程非常缓慢,苔藓对尘土的吸附能力也不大,总的年成土量在 0.01~0.1mm 数量级,而灌木草丛生物成土主要是凋落物的积累和根系生物化学作用,对土壤的贡献要大一些,约在 0.1~0.2mm/a 之间,如果没有人工干扰,冰川迹地的前期土壤演替阶段将达到 100~200a,泥石流滩地则只要 3~5a 就能出现适合树木生长的土壤结构。

在乔木生长出来以后,地表能够承接大量的树木凋落物质,树木根系也有很强的机械穿凿作用,土壤的形成速率最高,根据树木的种类和密度不同,凋落物的补给量也不同,但总的来说到一定阶段,凋落物的年补给与年分解速率相等,凋落物积聚层的厚度将保持稳定或缓慢增长,但凋落物产生的腐殖质土层却不

断增加,土壤的 N/C 含量也逐渐提高。具体林地土壤的养分积累除了与森林类型有关外,也与海拔高度有关。低海拔处气温高,土壤分解快,总的积累量不太高;而在高海拔地区森林的生产率低,凋落物量少,土壤养分也不高。只有在 2500~3400m 的亚高山区,森林生产率高,土壤的自然分解速率又低,土壤养分积累最高。这一模拟结果对于解释中国西南高山峡谷区森林生产率及环境影响非常重要。

6 结论

GFSM 模型在树木竞争和演替的理论基础上,采用适合中国西南亚高山区的环境和物种生态参数,较好地模拟了个体生存竞争环境下森林群落的自然演替动态和林下地被层的变化特点,是对该地区森林生态研究工作的总结和系统化。森林演替模型的研究将可能向两个方向继续发展,一个是利用现代计算机图象处理技术,将模拟树木的变化在虚拟图象空间中形象地展现出来,达到模拟成果的视觉化和直观表达的水平^[6~8]。另一个方向是与林地的物质-能量转换计算相结合,将生物地球化学机制引入模型结构设计中,使生态模型在微观层次上更接近生理和化学过程的仿真,在更高水平上揭示森林生态系统变化的内在规律。

参考文献

- [1] Chen Q Z (陈起忠), Li C B (李承彪). Study on the Growth Dynamic of Forest in Sichuan Province, In Li C B: *Ecological Research on Forest System in Sichuan Province, Chengdu*(in Chinese). SichuanSci. And Tech. Press, 1990. 427~447.
- [2] Zhong X H (钟祥浩). *Forest Ecosystem Research of Gongga Mountain*(in Chinese). Chengdu Uni. Of Sci. & Tech. Press, 1997. 51~80.
- [3] Botkin D B, Janak J F, *et al.* Some Ecological Consequences of a Computer Model of Forest Growth, *J. of Ecol.*, 1972, **60**:849~872.
- [4] Botkin D B. *Forest Dynamics: An Ecological Model*, Oxford Uni. Press, Oxford, 1993
- [5] Aber J D, Melillo J M. FORTNITE: A Computer Model of Organic Matter And Nitrogen Dynamics in a Forest Ecosystem. *Uni. of Wisconsin Res. Bul.*, R3130, 1982.
- [6] Acevedo M F, Urban D L, Ablan M. Transition and Gap Models of Forest Dynamics. *Ecological Applications*, 1995, **5**(4): 1040~1055.
- [7] Acevedo M F, Urban D L, Shugart H H. Models of Forest Dynamics Based on Roles of Tree Species. *Ecological Modeling*, 1996, **87**(1~3): 267~284.
- [8] Orland B, Ogleby C, Campbell H, and Yates P. Multi-media approaches to visualization of ecosystem dynamics. Proceedings, ASPRS/ACSM/ RT'97 -Seattle, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, D C. vol 4, 1997, 224~236.
- [9] Uusitalo J, Orland B. A forest visualization interface for harvest planning. ASPRS/ACSM/ RT'97 -Seattle, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, DC. Vol. 4, 1997. 216~223.
- [10] Orland B. Final Report: SmartForest-II: Forest Visual Modeling for Forest Pest Management and Planning. USDA Forest Service, FPM-FHTET, State and Private Forestry. 1997.
- [11] Orland B. Forest visual modeling for planners and managers. Proceedings, ASPRS /ACSM/ RT'97 -Seattle, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, D C. Vol. 4, 1997. 193~203.
- [12] Orland B, Daniel T C and Thorn A. SmartForest: Visualizing the Effects of Forest Harvest Practices. GIS'97-Vancouver. Ft. Collins, CO: GIS-World. 220~224.
- [13] Yan X D (延晓冬), Zhao S D (赵士洞), Research on the Growth Succession of Forest Ecosystem of Changbei Mountain, *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报), 1995, **14**(B): 12~21.
- [14] Yan X D (延晓冬), Zhao S D (赵士洞), Simulating Research of the C-pool Dynamic of Temperate Conifer-broad-leave mixed Forest, I: Arbor Dynamic. *Chinese J. of Ecology*(in Chinese) (生态杂志), 1995, **14**(2): 6~13.